认知控制的层级性：来自任务切换的脑电证据*

吴建校[1,2] 曹碧华[1] 陈云[1] 李子夏[1] 李富洪[1]

（[1]江西师范大学心理学院，南昌 330022）

（[2]南昌工程学院工商管理学院，南昌 330099）

摘 要 认知控制的主要研究范式之一是任务切换。以往研究发现切换代价受到认知控制层级性的调节，但鲜有研究探索这一调节过程的动态神经机制。本研究通过嵌套的线索-任务切换范式考察不同层级任务切换代价的差异及其神经机制。在实验中，要求被试完成高低两种层级任务，低层级任务要求被试判断数字大小（或奇偶）；高层级任务则须先加工数字的某一语义特征（如当前数字是否是偶数），然后进行大小判断。行为结果表明，高层级任务切换代价显著大于低层级任务切换代价。线索锁时的脑电结果表明，层级效应最早出现于P2成分，切换效应（切换与重复之差）在CNV成分上受到任务层级的调控，反映了在任务目标重构阶段给予高层级任务更多的选择性注意以及更高的主动性控制。目标锁时的脑电结果表明，在N2及慢波（SP）成分上，高层级任务切换与重复的波幅差异相比低层级任务显著更大，反映了在抑制旧任务集与重构新反应集的过程中增强的反应性控制。这些结果为任务设置重构论和认知控制的层级性提供了新的证据。

关键词 认知控制，任务切换，切换代价，层级控制

分类号 B842

1 引言

认知控制指个体在不断变化的环境中，灵活调动认知资源以调整行为的一种目标导向的心理过程（Miller & Cohen, 2001）。任务切换是研究认知控制的常用范式之一（史艺荃，周晓林，2004；黄四林，林崇德，2009；Vandierendonck et al., 2010）。与任务重复相比，任务切换的反应时更长、错误率更高，这被称为切换代价（Kiesel et al., 2010; Wylie & Allport, 2000; Wylie, et al., 2009; Xie et al., 2020; Zhuo et al., 2021a, 2021b）。切换代价（任务切换减任务重复）受到准备时间（Altmann, 2019; Kiesel et al., 2010）、任务属性（Woodward et al., 2003）、任务比例（蒋浩，2018; Baene & Brass, 2013; Frober et al., 2018; Grzyb & Hubner, 2013; Monsell & Mizon, 2006; Rogers & Monsell, 1995）和反应选择（Schuch & koch, 2003）等诸多因素的

收稿日期：2021-9-14

* 国家自然科学基金（31760285）、江西省高校人文社会科学项目（XL19209）、江西省教育科学“十四五”规划项目（21YB209）和江西省高校辅导员名师工作室资助。

通信作者：李富洪，E-mail: lifuhong@jxnu.edu.cn

影响。关于切换代价的主要理论解释有任务重构理论和干扰抑制论这两大主流观点。重构论的主要观点是：切换代价的产生是被试需要花费更多的时间进行一种内源性的、自上而下的控制加工。这种执行控制加工需要重构新任务，即重新设置切换的相关任务，而这种重新设置或重构的加工过程涉及额外的控制需求（Mayr & Kliegl, 2000; Rogers & Monsell, 1995）。相反，干扰抑制论认为切换代价并非源于新任务集的重构，而是产生于前一任务和当前任务执行之间的干扰（Allport & Wylie, 1999; Meiran, 2008; Waszak et al., 2003; Wylie & Allport, 2000）。

1.1 任务切换的主动性控制和反应性控制

认知控制的双理论模型(Dual Mechanisms of Cognitive Control Account, 简称 DMC 理论, Braver et al., 2007）指出认知控制可区分为主动性控制（Proactive control）和反应性控制（Reactive control）。主动性控制指对即将出现的任务给予不同程度的自上而下的准备过程，这些过程可以通过改变目标出现前的准备时间、线索属性操纵。研究者采用交替运行范式（Karayanidis et al., 2003, 2010）、线索-任务切换范式（Kieffaber & Hetrick, 2005; Nicholson et al., 2005; Swainson et al., 2006）以及威斯康星卡片分类任务（Barceló et al., 2000）进行的研究发现，与任务重复相比，在任务切换的线索出现时，头皮中央和后部所诱发的切换正波（Switch-related positivity; Karayanidis et al., 2003; Kieffaber & Hetrick, 2005; Nicholson et al., 2005; Swainson et al., 2006）可能反映了这一主动性控制的过程。切换正波会受到线索有效性 （Nicholson et al., 2006; Karayanidis & Jamadar., 2014）以及线索与目标之间的时间间隔的调节（Baene & Brass, 2013; Karayanidis et al., 2003; Kieffaber & Hetrick, 2005; Nicholson et al., 2005），并且与反应时切换代价相关联（Karayanidis et al., 2010）。另外，研究发现在线索加工完成后至目标即将呈现之前的时间窗口，任务切换和重复均在额中区域诱发了伴随性负波（Contingent negative variation, CNV），这一成分可能和预期性注意（Brunia, 1999）或反应准备过程相关（Karayanidis & Jamadar., 2014）。另一些脑电研究也为任务切换主动性控制过程提供了相应的证据。例如，采用线索-任务切换范式发现线索锁时阶段任务切换诱发的 P3 和晚期正成分（Late positive component, LPC）波幅更大（Han et al., 2018; Kieffaber & Hetrick, 2005），反映了个体在任务或规则学习阶段，对相应任务或规则的准备过程（Altmann, 2019; Kiesel et al., 2010）。

反应性控制指目标出现后个体通过最大限度地减少与目标无关信息的干扰来优化目标处理的过程。研究发现，在目标锁时的 ERPs 中，相比任务重复，任务切换诱发了更负的大脑前部和中部 N2 以及更小的顶叶 P3b 波幅（Karayanidis et al., 2003; Nicholson et al.,2005），

反映了个体对目标特别是任务切换条件下的反应性控制。大脑前部和中部诱发的 N2 成分通常反映了冲突监测与干扰控制（Folstein & Van, 2008; Gajewski et al., 2008; Yeung & Cohen, 2006; Zhu et al., 2020）。Nicholson 等（2005）亦发现，与任务重复相比较，任务切换下目标诱发更大的 N2 波幅，反映了被试在任务切换时表现出更大的反应冲突（Gajewski et al., 2010）。紧随 N2 成分之后的是 P3b 成分，目标锁时的 P3b 成分是任务切换研究领域中最为常见的一种成分，然而不同于线索锁时的 P3b 成分，相对于任务重复，任务切换诱发的目标锁时的 P3b 波幅更小，即表现出切换负波（Barceló et al., 2000; Kieffaber & Hetrick, 2005; Karayanidis et al., 2003, 2010; Nicholson et al., 2005）。这一切换负波可能反映了任务切换相比任务重复具有更高的任务要求和更大的工作记忆负荷（Barceló et al., 2000; Karayanidis et al., 2003）。在对切换任务进行反应时，需要更新任务集，即在工作记忆系统中重新提取新的规则以及 S-R 联结，因此相对于重复任务，其 S-R 联结更不稳固（Barceló, et al., 2000; Waszak et al., 2003）。

1.2 任务切换的层级性

层级表征已被证明在感知（Hommel et al., 2000）、工作记忆（Nie et al., 2017）以及动作执行（Rosenbaum et al., 1983）等诸多认知过程中存在。在日常生活中，某一任务及动作执行通常由多个步骤组成，这些步骤可以层级的形式表征（Lashley, 1951）。例如，‘煮咖啡’这一任务是由一系列嵌套的子任务（研磨咖啡豆、冲泡等）构成。因此，层级表征是一种由相互嵌套的成分及其子成分构成的心理表征，其中上位信息对下位的子成分产生影响（Schneider & Logan, 2006）。层级表征在目标任务导向中扮演着重要的角色（Badre & Nee, 2018），因为人们可以对客体属性按层级分类，降低属性或类别内的自由度，以便在有限的认知资源下更好更快地做出决策并进行反应（Badre & Nee, 2018; Collins, et al., 2014; Kleinsorge & Heuer, 1999）。Kleinsorge 和 Heuer（1999）利用‘任务集（task-set）’的维度组织结构探索维度数量及层级水平对切换代价的影响，并提出了层级任务切换模型。该模型包含了任务判断类型、S-R 联结的一致性以及反应是否切换三种不同层级水平。其中，任务判断类型为最高层级，S-R 联结的一致性为中间层级，反应切换与重复层级最低。研究者采用线索与目标相结合的实验范式，通过呈现于屏幕中心点上下两个方框的空间线索提示被试需要执行的任务是判断中央数字的大小还是判断一侧数字所处方位（左或右）；通过数字的颜色提示被试应当选用与日常行为一致或不一致的 S-R 联结规则（如对于数字大小任务，绿色表示采用一致规则，即左小右大的按键规则，红色表示采用不一致规则，即左大右小的按

键规则）；反应是否切换是指前后两个试次的物理按键是否相同。结果发现，当任务判断类型切换时，其切换代价最高；当任务判断类型重复，S-R 联结规则切换相比 S-R 联结规则重复时切换代价更大，但当任务判断类型切换，其切换代价更小；另外，当任务判断类型和 S-R 联结规则均重复，反应切换会产生切换代价，反之会降低切换代价。据此，切换代价的变化取决于层级结构中需要改变的维度数量和维度的层级水平。他们认为，在一个任务集中，若层级结构的顶层发生变化，所有层级都须重新设置；相反，若最低层级发生变化，只有该层级参与重新设置。当个体切换某一层级，他们也会自动切换所有较低层级。因此，当任务判断类型和 S-R 联结规则都发生切换时，与只有一个任务判断类型发生切换时相比，切换代价更小。简言之，在一个任务集里，做什么（即任务目标），怎么做（即反应规则）以及动作执行是以由高到低层级形式被表征的。

近年来，一些研究表明，任务集的元素如刺激的知觉特征或 S-R 规则各自也可以层级的形式表征（Collins et al., 2014; Han et al., 2018, 2019）。如 Collins 等（2014）采用刺激与反应的强化学习任务，给被试呈现颜色（红色，黄色）与形状（三角形，圆形）正交组合的四种不同的刺激并告之对应四个不同的按键，让被试进行学习并给予反馈。研究者关注的是被试能否将刺激的某一维度（如颜色）视为高层属性，将另一维度（形状）视为低层属性；如果能则比较高层级切换（如红色圆形切换到黄色圆形或黄色三角形）与低层级切换（如红色圆形切换到红色三角形）的切换代价的差异及其神经机制。行为结果表明，被试确实能自主形成刺激知觉特征的层级表征，脑电结果表明，高层级切换（如红色圆形切换到黄色圆形或黄色三角形）相对于低层级切换（如红色圆形切换到红色三角形）在顶叶皮层诱发了更负的晚期 ERP 成分（450～609 毫秒），表明高层级切换需消耗更多的认知资源。Han 等（2018）采用线索任务切换范式，将线索（字母 R）的三种知觉维度中的一种（如实心或空心）设为高层属性，另外两种则设为低层属性，并采用嵌套的方式将低层属性隶属于高层属性。要求被试根据线索的不同属性指引的规则对随后的目标刺激（即数字 1～9 中的一个）进行反应。结果发现，在线索锁时阶段，高层规则切换比低层规则切换诱发了更小的 N2 和更大的 P3 波幅，反映了在规则学习阶段增强的主动性控制；在目标锁时阶段，高层规则切换比低层规则切换诱发更负的 N2 和更小的 P3 波幅，反映了任务执行阶段增强的反应性控制。Han 等（2019）将线索和任务同时呈现，得出类似的结果。另外，Li 等（2019）采用嵌套的任务切换范式并定义了三种不同层级水平的数字判断任务，发现向上切换（即从低层级任务切换到中层级任务）比向下切换（即从高层级任务切换到中层级任务）诱发更负的 N2 波幅和持

续正波（Slow Positvity），反映了不同的反应抑制和任务重构过程。

现有行为研究表明，任务切换中的任务集和其中的元素（如刺激的知觉特征与反应规则）的表征存在层级性，高层级表征间的切换代价高于低层级表征间的切换代价（Collins et al., 2014; Han et al., 2018, 2019）；现有脑电研究却因为不同研究者的关注点不同得出不尽相同的结论。例如，Li 等（2019）采用了嵌套的三层级任务，关注切换代价的层级不对称性的，即不同方向的跨层级切换问题，发现由低向高跨级切换的认知控制的增大与 N2 波幅的增大相联系；另外三项研究（Collins et al., 2014; Han et al., 2018, 2019）关注的是刺激知觉维度或反应规则的层级性。Collins 等（2014）发现，高层级的知觉维度切换相对于低层级知觉维度切换在顶叶皮层诱发了更负的晚期负波；Han 等（2018, 2019）发现高层级的反应规则切换条件下的靶刺激诱发了比低层反应规则切换更负的 N2 波幅。本研究与已有两个研究（Han et al., 2018, 2019）一样，依然围绕认知控制的层级性及其神经机制进行探索。不同的是研究切入点有所不同，Han 等（2018, 2019）的研究切入点是反应规则切换的层级性，即比较两个高层规则（如规则 1 “如果线索字母 R 为实体则根据颜色选择不同的任务” 与规则 2 “如果线索字母 R 为空心则根据方向选择不同的任务”）之间的切换代价与两个低层规则（如规则 3 “如果实体线索字母 R 为红色则做大小判断任务” 与规则 4“如果实体线索字母 R 为绿色则做奇偶判断任务”）之间的切换代价的差异。而本研究的切入点是任务切换的层级性，即比较两个高层级任务（如任务 1“判断大数的奇偶性” 与任务 2“判断奇数的大小”）之间的切换代价与两个低层级任务（如任务 3“判断数字的大小” 与任务 4“判断数字的奇偶”）之间的切换代价的差异。本研究特别关注不同层级内的任务切换代价差异背后的神经机制。简言之，大量行为研究已经揭示高层级任务切换的代价大于低层级任务切换的代价，但至今无人采用 ERP 技术揭示任务集内另一重要的元素，即任务本身的层级性所诱发的认知控制的神经机制，尽管部分研究者从刺激的知觉维度的层级性（Collins et al., 2014）与反应规则的层级性（Han et al., 2018, 2019），以及跨层级切换的不对称性（Li et al., 2019）进行了一些探索，但这些研究都未涉及任务的层级性。

1.3 本研究目的与假设

本研究旨在利用 ERP 高时间分辨率的优点探索在任务切换过程中认知控制的层级性及其神经机制。本研究将以线索-任务范式考察线索加工相关的主动性控制与目标相关的反应性控制是否会受任务层级性的调节，如果是，层级对这两种控制过程的调节分别在哪些 ERP 成分上体现，是否也会在 N2/P3 等与冲突反应抑制和任务设置重构的成分上体现出这一层

级性？

在本研究中设计了具有层级嵌套结构的两层级任务（Li et al., 2019; Lu et al., 2017）。在低层级任务中，个体需要判断数字大小（或奇偶），而高层级任务则需要被试在执行低层级任务之前，先识别刺激的某一语义特征（图 1）。基于以往有关任务切换和层级控制的研究（Karayanidis et al., 2003, 2010; Kleinsorge & Heuer, 1999; Collins et al., 2014; Han et al., 2018; Li et al., 2019），本研究假设：（1）低层级任务和高层级任务之间存在维度数量的不同，低层级任务只需加工一个维度，而高层级任务需要加工数字的两个维度；因此，高层级任务相较于低层级任务可能诱发更长的反应时与更高的错误率；高层级任务切换时，两个维度均需要切换，受前一任务的干扰可能更高，同时重置新任务集时间可能更长；因此，高层级任务切换代价相较于低层级任务切换代价更大。（2）现有关于线索-任务切换范式下的脑电研究表明，在线索锁时阶段的任务切换相对于任务重复诱发更小的 N2 和更大的 P3 波幅（即切换正波），但目标刺激诱发的 N2 和 P3 波幅在任务切换与任务重复之间的差异却出现了反转（即切换负波）；本研究假设，无论是线索诱发的切换正波还是目标诱发的切换负波，都可能受到任务层级性的调节，并体现于 N2、P3 或慢波（Slow potential, SP）等反映主动性与反应性控制的成分上，即在这些成分上高层级任务切换与重复的波幅差异可能大于低层级任务切换与重复的波幅差异。（3）根据 Kleinsorge 和 Heuer（1999）层级任务切换模型，与 S-R 联结规则相比，任务目标的层级更高，其认知控制的需求也更高，完成控制加工的时间可能也更长，因此，其认知控制的层级性在切换正波（或负波）上的出现时间可能较 Han 等（2018）的规则切换的层级效应出现时间更晚。

2 方法

2.1 被试

江西师范大学 30 名右利手志愿者（15 名男性；年龄 18～23 岁；平均年龄 19.3 岁）参加实验。所有被试无任何精神或神经系统疾病，视力正常或矫正至正常，无色盲。2 名被试因脑电伪迹过多而被排除。采用 G-power 软件计算，使用中等的效果量（η_p^2 = .25），期望的功效值（$1-\beta = 0.80$）以及显著性水平（$\alpha = .05$），计算需要被试样本量为 24，因此实际样本量符合要求。所有被试均提供了书面知情同意书，并在完成实验后获得一定数额的报酬。

2.2 材料和设计

采用嵌套的线索-任务切换范式（Badre & D'Esposito, 2007; Li et al., 2019），设置两种不同层级的任务。低层级任务要求被试根据线索对数字（1～9，不包括 5）进行奇偶判断或大

小判断。此类任务只要求被试加工数字的一种语义特征（如奇偶或者大小）。

高层级任务要求被试在执行低层级任务之前须先识别数字某种属性。例如，对大于 5 的数进行奇偶判断，被试首先需要确认当前刺激的数字是否大于 5，如果“是”则对其进行奇偶判断。如果“否”则不需要做任何反应（nogo 试次）。nogo 试次出现频率约为 16%。nogo 试次及其随后的第一个 go 试次作为填充试次不计入统计分析。在高层级任务中，对两种语义（奇偶和大小）均需要进行加工，奇偶和大小属性可以正交组合成四种不同类型的高层级任务，分别是“对大于 5 的数进行奇偶判断”、“对小于 5 的数进行奇偶判断”、“对奇数进行大小判断”以及“对偶数进行大小判断”。为了确保被试在执行高层级任务切换时，两个相邻目标数字的属性确认过程和数字判断均需切换，两种相同语义加工的高层级任务（如对大于5的数进行奇偶判断和对小于5的数进行奇偶判断）不会被安排在同一个实验程序内。颜色和形状组合的线索对应不同类型的任务，高、低层级任务伪随机安排在同一 Block 中。被试根据线索指定的规则对奇数或大于 5 的数字用左手食指按 F 键反应，对偶数或小于 5 的数用右手食指按 J 键反应。线索对应的任务及反应按键在被试间进行平衡。

采用 2（切换类型：任务重复，任务切换）× 2（层级：低层，高层）的被试内设计。根据前后两个试次间的关系，设定低层级任务重复、低层级任务切换、高层级任务重复、高层级任务切换四种实验条件；每种条件的试次数为 85 个。其它条件（如由高层级任务切换到低层）为填充试次，其中由高层级任务切换到低层级任务及由低层级任务切换到高层级任务的试次数均为 85 个；nogo 试次数 115 个，随后的试次数 115 个，共计 740 个试次。分 4 个 Block 进行，每个 Block 一共有 185 个试次。整个实验耗时约 60 分钟左右。

2.3 程序

被试的任务是根据线索提示对目标刺激进行不同的语义加工。任务规则如图 1 所示。要求被试判断当前数字是否为奇数。在实验中，首先在屏幕中心呈现 500 毫秒的“+” 字注视点， 随后 500～800 毫秒的随机空屏后呈现线索 1000 毫秒，再次呈现 500～800 毫秒的随机空屏之后呈现数字刺激，刺激在被试按键后消失。被试在正式实验开始之前，需要完成一个练习 Block，练习中给被试提供反馈。在整个实验过程中，告知被试需要尽可能快速准确地做出反应。

2.4 EEG 记录及分析

采用 BP 脑电系统采集和记录脑电数据。使用 10-20 国际标准扩展的 64 导联电极帽，在线参考点位于 FCz 电极，接地点位于 AFz 电极，垂直眼电（EOG）放置于右眼框正下方 1 厘米处。采样频率为 500Hz，带通滤波为 0.05～100 Hz。所有电极电阻均小于 10 KΩ。

离线分析将双侧乳突（TP9 和 TP10）重新设置为参考点，通过独立主成分分析（ICA）剔除所有电极点上的眨眼、眼漂、肌电等伪迹，离线带通滤波为 0.1～24Hz；伪迹剔除标准为±80 μV。ERP 分段时程为-200～1000 毫秒，基线为刺激出现前 200 毫秒，对每个条件正确的试次进行叠加平均，最后把所有被试的各个条件分别进行总平均。

基于以往任务切换和层级控制的相关研究（Han et al., 2018; Li et al., 2019; Lu et al., 2017; Rubinstein et al., 2001），选择了 18 个电极点，分别是 F1、F2、F3、F4、F5、F6、C1、C2、C3、C4、C5、C6、P1、P2、P3、P4、P5 和 P6 电极点，并根据区域合并电极点形成 6 大脑区，分别是左侧额区（F1、F3 和 F5）、右侧额区（F2、F4 和 F6）、左侧中央区（C1、C3 和 C5）、右侧中央区（C2、C4 和 C6）、左侧顶区（P1、P3 和 P5）和右侧顶区（P2、P4 和 P6）。根据以往研究及肉眼可视的 ERP 波形差异，在线索锁时阶段，选取左侧顶区的 P2（220～270 毫秒）和 CNV（800～1000 毫秒）的平均波幅进行 2（层级：高、低）×2（任务类型：重复、切换）的重复测量方差分析。为了更为直观地展现不同层级下切换代价在不同脑电成分上的特点，进一步对切换试次与重复试次间的的差异波（任务切换减任务重复）进行配对样本 t 检验。在目标锁时阶段，选取了 P2（150～200 毫秒）、N2（200～250 毫秒）、P3（340～420 毫秒）及 SP（600～1000 毫秒）四个时窗进行重复测量方差分析。因为 N2 差异主要体现于前中部，所以对 N2 的平均波幅进行 2（层级：高、低）×2（任务类型：重复、切换）×2（前后脑区：额区、中央区）×2（左右半球：左、右）的重复测量方差分析；对 P2、P3 和 SP 的平均波幅进行 2（层级：高、低）×2（任务类型：重复、切换）×3（前后脑区：额区、中央区和顶区）×2（左右半球：左、右）的重复测量方差分析。此外，对 N2 的差异波进行 2（层级：高、低）×2（前后脑区：额区、中央区）×2（左右半球：左、右）的重复测量方差分析；对 P2、P3 和 SP 的差异波幅进行 2（层级：高、低）×3（前后脑区：额区、中央区和顶区）×2（左右半球：左、右）的重复测量方差分析。采用 Greenhouse-Geisser 方法对 p 值进行校正，多重检验时采用 Bonferroni 方法对 p 值进行校正，显著性水平 α 为 0.05。

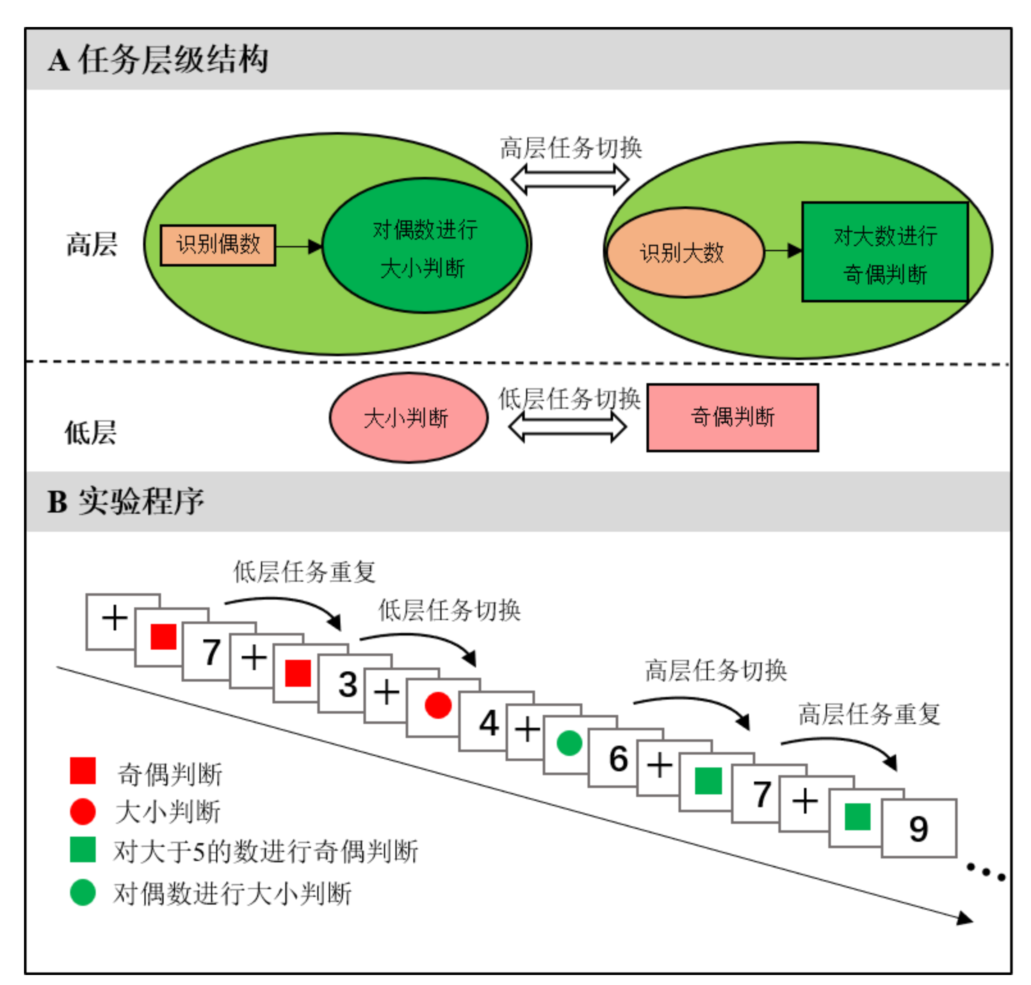


图 1　任务层级结构及实验程序

3 结果

行为反应时和脑电数据均基于正确试次进行分析，这些试次中不包含练习数据和每个 Block 的第一个数据；不包括行为反应时快于 200 毫秒，或超过被试平均反应时的 2.5 个标准差的试次；不包括错误后的试次；不包括 nogo 试次以及随后的第一个 go 试次；不包括填充试次。对于正确率，计算了除 nogo 试次以及随后的第一个 go 试次和填充试次以外的正式实验数据。

3.1 行为结果

不同条件下的正确率与反应时如表 1 所示。对正确率的分析结果表明，任务类型主效应边缘显著，$F(1, 27) = 4.21, p = 0.050, \eta_p^2 = 0.13$，任务切换的正确率（94.9%）低于任务重复（96.3%）；层级主效应显著，$F(1, 27) = 43.06, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.61$，高层级任务的正确率（93.9%）低于低层级任务（97.3%）。任务类型和层级交互作用不显著（$p = 0.341$）。对低层级任务切换代价（-0.8%）及高层级任务切换代价（-2%）进行配对样本 t 检验表明两者之间差异不显著（$p > 0.050$）。

对反应时分析结果表明，任务类型主效应显著，$F(1, 27) = 62.84, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.69$，

任务切换的反应时（1030 毫秒）长于任务重复（869 毫秒）；层级主效应显著，$F(1, 27) = 115.87$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.81$，高层级任务的反应时（1093 毫秒）长于低层级任务（806 毫秒）。任务类型和层级交互作用显著，$F(1, 27) = 21.61$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.44$。简单效应分析发现：不论是高层级或低层级，任务切换反应时均长于任务重复；不论是任务重复还是任务切换，高层级任务的反应时均长于低层级任务。对低层级任务切换代价及高层级任务切换代价进行配对样本 t 检验的结果表明，高层级任务切换代价（236 毫秒）显著大于低层级任务切换代价（87 毫秒），$t[27] = 4.65$, $p < 0.001$, $d = 1.78$。

表 1 不同条件下的反应时（毫秒）和正确率（%）

实验条件	反应时 ($M \pm SD$)	正确率 ($M \pm SD$)
低层级任务重复	763±170	97.7±2
低层级任务切换	850±206	96.9±3
高层级任务重复	975±138	94.9±4
高层级任务切换	1211±202	92.9±5

3.2 脑电结果

3.2.1 线索锁时 ERP

P2 层级主效应显著，$F(1, 27) = 8.71$, $p = 0.006$, $\eta_p^2 = 0.244$，高层级任务（5.65μV）相比低层级任务（4.75μV）诱发更大的 P2 波幅（如图 2）。其他主效应及交互作用不显著（$ps > 0.050$）。对差异波进行配对样本 t 检验发现，高层级任务切换与任务重复间的波幅差异（0.31μV）与低层级任务切换与任务重复间的波幅差异（0.30μV）相比无显著性差异，$t[27] = -0.01$, $p = 0.989$, $d = -0.005$。

CNV 层级主效应不显著（$p > 0.050$）。任务类型主效应显著，$F(1, 27) = 24.36$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.474$，任务切换（1.51μV）相比任务重复（0.23μV）诱发的波幅更正；层级与任务类型之间交互作用显著，$F(1, 27) = 5.17$, $p = 0.031$, $\eta_p^2 = 0.161$，进一步简单效应分析发现，在每一种层级水平上，任务切换相比任务重复都诱发了更正的 CNV 波幅（$p_{低层} = 0.004$，$p_{高层} < 0.001$）；对于任务切换，高层级任务切换（1.92μV）相比低层级任务切换（1.09μV）诱发更正的波幅（$p = 0.018$），任务重复不存在层级间的差异（$p = 0.995$）。对差异波进行配对样本 t 检验发现，高层级任务切换与重复间的波幅差异（0.82μV）显著大于低层级任务切换与重复间的波幅差异（-0.01μV），$t[27] = 2.27$, $p = 0.031$, $d = 0.87$。

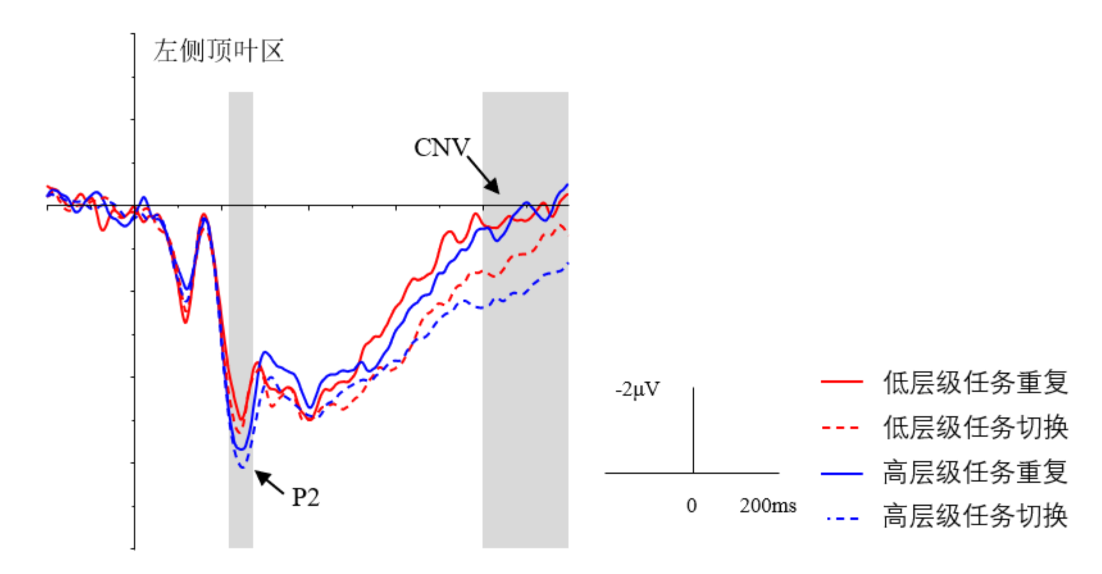


图 2 线索锁时不同条件的 ERP 波形

3.2.2 目标锁时 ERP

P2 任务类型主效应显著，$F(1, 27) = 5.47$, $p = 0.027$, $\eta_p^2 = 0.169$，任务切换（2.27μV）比任务重复（2.76μV）诱发更小的 P2 波幅；层级与任务类型之间交互作用显著，$F(1, 27) = 8.41$, $p = 0.007$, $\eta_p^2 = 0.238$，进一步简单效应分析发现在高层级任务水平上，任务切换（2.14μV）比任务重复（3.08μV）诱发的 P2 波幅更小（$p = 0.002$），在低层级水平上无差异（$p = 0.860$）。对差异波进行重复测量分析发现，层级主效应显著，$F(1, 27) = 8.41$, $p = 0.007$, $\eta_p^2 = 0.238$，高层级任务差异波（-0.93μV）相比低层级任务差异波（-0.04μV）更大。脑区主效应显著，$F(1, 27) = 14.35$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.347$；顶叶区域的差异波（0.04μV）相比额叶区域（-0.81μV）、中央区域（-0.68μV）的差异波更小。左右半球主效应边缘显著，$F(1, 27) = 3.66$, $p = 0.066$, $\eta_p^2 = 0.119$。

N2 任务类型主效应显著，$F(1, 27) = 6.31$, $p = 0.018$, $\eta_p^2 = 0.189$，任务切换（2.31μV）相比任务重复（2.86μV）诱发更负的 N2 波幅（如图 3）；层级与任务类型之间交互作用边缘显著，$F(1, 27) = 3.68$, $p = 0.066$, $\eta_p^2 = 0.120$。对差异波进行重复测量方差分析发现，层级主效应显著，$F(1, 27) = 4.82$, $p = 0.037$, $\eta_p^2 = 0.152$，高层级任务差异波（-0.89μV）相比低层级任务差异波（-0.20μV）更大；左右半球主效应显著，$F(1, 27) = 6.10$, $p = 0.020$, $\eta_p^2 = 0.185$，左半球差异波（-0.69μV）相比右半球差异波（-0.40μV）更大；其他主效应及交互作用不显著（$ps > 0.050$）。

P3 任务类型主效应显著，$F(1, 27) = 9.52$, $p = 0.005$, $\eta_p^2 = 0.261$，任务切换（2.71μV）相比任务重复（3.53μV）诱发更小的 P3 波幅；层级、前后脑区与左右半球之间交互作用显著，

$F(2, 54) = 8.59$, $p = 0.002$, $\eta_p^2 = 0.241$，但是进一步简单效应分析未发现显著性的结果（$ps > 0.050$）。任务类型与左右半球之间交互作用显著，$F(1, 27) = 4.26$, $p = 0.049$, $\eta_p^2 = 0.136$，进一步简单效应分析发现两侧半球，任务切换相比任务重复诱发更小的 P3 波幅（$p_{左} = 0.004$；$p_{右} = 0.008$）。其他主效应及交互作用不显著（$ps > 0.050$）。对高、低层级任务差异波进行方差分析发现主效应及其交互作用均不显著（$ps > 0.050$）。

SP 任务类型主效应显著，$F(1, 27) = 6.48$, $p = 0.017$, $\eta_p^2 = 0.194$，任务切换（0.69μV）相比任务重复（1.27μV）诱发更小的 SP 波幅；层级与任务类型之间交互作用显著，$F(1, 27) = 4.99$, $p = 0.034$, $\eta_p^2 = 0.156$，简单效应分析发现在高层级任务水平上，任务切换（0.45μV）相比任务重复（1.51μV）诱发更小的 SP 波幅（$p = 0.004$），低层级任务水平上不存在任务切换和重复试次的波幅差异（$p = 0.693$）。任务类型与前后脑区之间交互作用边缘显著，$F(2, 54) = 3.35$, $p = 0.062$, $\eta_p^2 = 0.111$。任务类型与左右半球脑区之间存在交互作用，$F(1, 27) = 4.21$, $p = 0.05$, $\eta_p^2 = 0.135$，简单效应分析发现在左侧区域，任务切换（0.32μV）相比任务重复（1.13μV）诱发更小的 SP 波幅（$p = 0.003$）；右侧无差异（$p = 0.172$）。层级、任务类型与作用半球之间交互作用显著，$F(1, 27) = 5.83$, $p = 0.023$, $\eta_p^2 = 0.178$，简单效应分析发现在左侧区域，高层级任务切换（-0.07μV）相比高层级任务重复（1.36μV）诱发更小的 SP 波幅（$p = 0.001$）；在右侧区域无其它显著性结果（$ps > 0.050$）。其他主效应及交互作用不显著（$ps > 0.050$）。对差异波进行重复测量方差分析发现，层级主效应显著，$F(1, 27) = 4.99$, $p = 0.034$, $\eta_p^2 = 0.156$，高层级任务差异波（-1.05μV）相比低层级任务差异波（-0.11μV）更大；左右半球主效应边缘显著，$F(1, 27) = 4.21$, $p = 0.050$, $\eta_p^2 = 0.135$，左半球差异波（-0.80μV）相比右半球差异波（-0.36μV）更大；左右半球与层级交互作用显著，$F(1, 27) = 5.83$, $p = 0.023$, $\eta_p^2 = 0.178$，简单效应分析发现在左侧半球，高层级任务差异波（-1.44μV）相比低层级任务差异波（-0.16μV）更大（$p = 0.011$），在右侧半球不存在差异（$p = 0.166$）；其他主效应及交互作用不显著（$ps > 0.050$）。

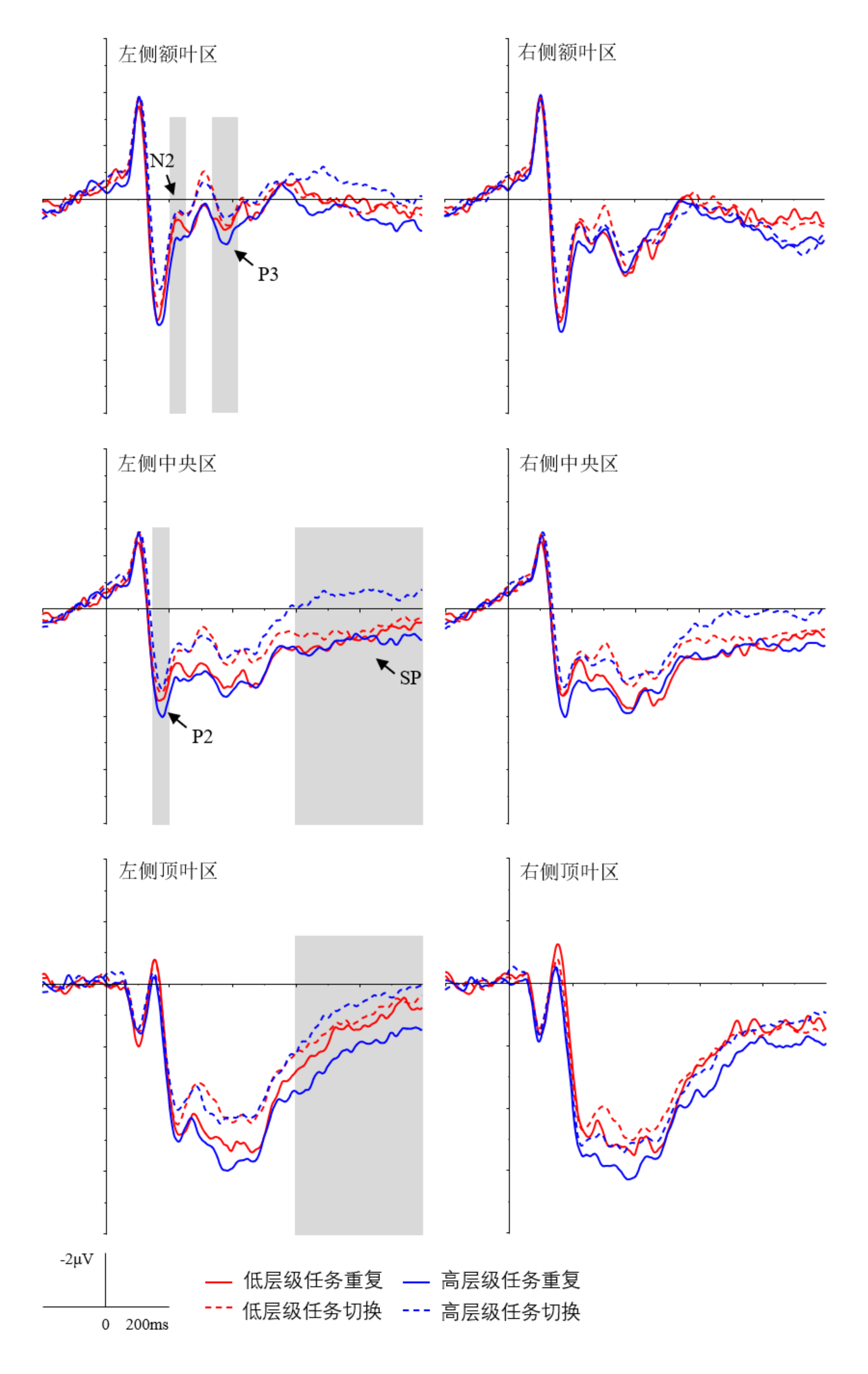


图 3 目标锁时不同条件的 ERP 波形

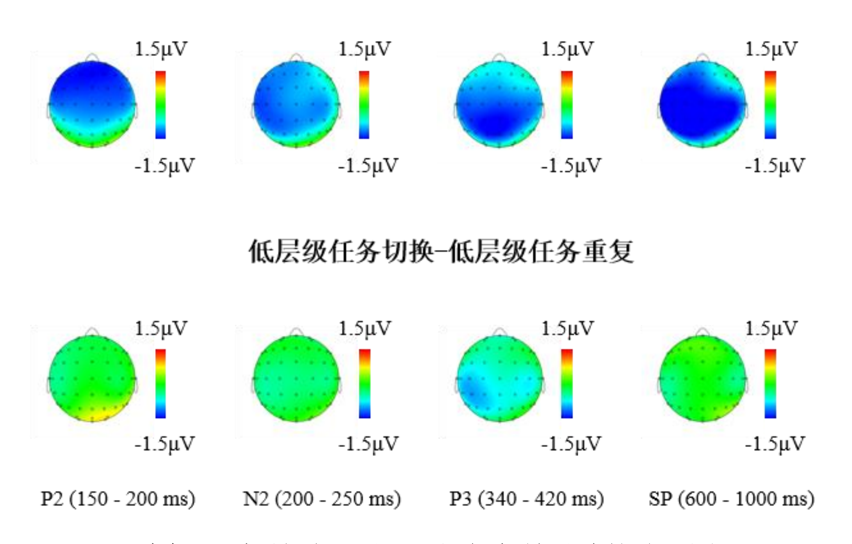


图 4 目标锁时下不同层级任务差异波的地形图

4 讨论

本研究采用线索-任务切换范式，比较了高低两种层级任务切换的认知控制（即主动性控制和反应性控制）相关的电生理学差异。行为结果发现，相比于任务重复，任务切换的反应时更长，错误率更高，反映了典型的切换代价（Barceló & Cooper, 2018; Kiesel et al., 2010; Rogers & Monsell, 1995; Schneider, 2017; Swainson et al., 2017, 2019; Tarantino et al., 2016）；与低层级任务相比，高层级任务的反应时更长，错误率更高，这与已有关于层级任务的研究结果一致，反映了高层级任务更复杂更抽象（Hirsch et al., 2020; Li et al., 2019; Lu et al., 2017）。

任务类型与层级存在交互作用，切换代价受到层级的调控，高层级任务切换代价显著高于低层级任务切换代价，这一结果与以往相关研究的结论一致（Kleinsorge & Heuer, 1999; Collins et al., 2014）。在本研究中，高低层级任务之间信息加工的复杂性不同。在执行低层级任务时，个体只需加工刺激的一种语义特征（如判断数字的奇偶性），在任务切换时只需将任务目标转移到另一语义特征（如判断大小）。相比之下，在高层级任务切换时，数字识别和语义判断过程都发生了切换。根据惯性论（干扰论）的观点（Allport et al., 1999; Meiran, 2008; Waszak et al., 2003; Wylie & Allport, 2000），低层级任务切换时，先前任务只涉及刺激的一种属性（奇偶判断），个体在执行当前任务时（大小判断）只需要抑制先前的奇偶判断即可。而在高层级任务当中，先前的任务涉及刺激的两种属性（如对大数进行奇偶判断），而当前任务是对偶数进行大小判断，即需要的抑制控制更多。根据任务设置重构论（Mayr & Kliegl, 2000; Rogers & Monsell, 1995），在高层级任务中需要重构的任务元素（如在本研究中

的数字识别与随后的语义判断、反应选择等）较低层级任务更丰富复杂，从而导致其切换更困难。第二，高低层级任务间由线索诱发的主动性控制不同。Nicholson 等（2006）通过操纵线索的信息有效性程度分离预期准备对主动性控制和反应性控制的调节过程。结果发现增加线索-刺激的间隔（CSI）只对主动性控制产生影响。在本研究中，线索-刺激的时间间隔为 1.6 秒，低层级任务可以通过预先的准备降低切换代价，然而在高层级任务中是否需要执行任务必须待目标刺激出现之后，完成第一阶段的加工方可知晓该试次是否需要执行（按键反应），因此，高层级切换代价增大也可能是由于 CSI 期间主动性控制加工更不充分造成的。

需要注意的是，本研究中高层级任务相比低层级任务存在更大的反应时切换代价并非由偶尔的分心（nogo）试次导致。被试在遇到这些试次时不需要做出任何反应，这与考察反应抑制的研究中的 nogo 试次相似。以往研究表明，在任务转换中引入 nogo 试次会诱发任务重复试次中的 N-2 重复代价，即导致一些重复试次的反应时间延长，从而导致切换代价的降低甚至消失（Schoch & Koch, 2003）。然而，本研究在包括一些 nogo 试次的高层级任务条件下，其切换代价更大。因此可以推断，高层和低层级任务之间的显著差异不是由于 nogo 试次的出现。

4.1 主动性控制的层级性

在线索任务切换的研究中，研究者常常将线索加工阶段定义为主动性控制的过程（Karayanidis et al., 2003），即被试有选择地对任务相关的线索信息进行注意加工，在工作记忆中积极地表征和维持这一线索信息，从而形成相应的反应准备。本研究发现，在线索锁时的 P2 时窗上存在明显的层级效应，这一结果与 Han 等（2018）的结论一致。这说明不论是他们操纵的层级规则，还是本研究中的层级任务，高低层级间的差异都最早在线索呈现后 200 毫秒左右被大脑感知。顶区 P2 与早期的感知过程（Han et al., 2018）、注意过程（Luck & Hillyard, 2010）相关联。例如，当个体需要对目标刺激是否与任务相关的知觉特征进行甄别时会观察到明显的 P2 成分（Han et al., 2018）。在本实验中，高层级任务的线索相比低层级任务诱发更大的 P2 波幅，说明被试在对高层级任务进行准备时，对线索的知觉维度特征进行编码时给予的注意资源更多，为后续提取更复杂的任务规则做足准备。

在 CNV 时窗，无论是在高层级任务还是在低层级任务中，任务切换均相比任务重复诱发了更正的波幅，这一切换正波反映了任务切换和任务重复之间不同的任务准备过程。以往研究表明，任务范式（Karayanidis et al., 2003, 2010; Kieffaber & Hetrick, 2005; Nicholson et al., 2005; Swainson et al., 2006）、线索呈现方式（Kieffaber & Hetrick, 2005）、线索的明确性（Rushworth et al., 2002）以及练习程度（Karayanidis et al., 2003; Nicholson et al., 2005）都

不影响切换正波的出现，表明提示任务切换与任务重复的线索呈现时主动性控制过程的卷入程度不同。在本研究中，线索锁时的 CNV 时窗的切换正波可能反映了这一主动性控制过程。

此外，在 CNV 时窗，高层级任务切换与重复间的波幅差异显著大于低层级任务切换与重复间的波幅差异。这一任务切换与重复的差异波在两层级间的差异源于高层级任务切换相比低层级任务切换诱发波幅更正的走向。有研究表明 CNV 作为主动性控制的有效指标，对困难任务相对简单任务的准备更需要主动性控制参与（Poljac & Yeung, 2014），并且受到任务集维度数量的调控（Kieffaber et al., 2013），任务集的维度越多，需要的主动性控制越强，诱发的 CNV 波幅就越正。在应对具有不同维度参数的任务切换时，大脑给予多维度任务切换更多的主动性控制（Kleinsorge & Heuer, 1999）。本研究认为线索诱发的 CNV 波幅可能反映了对不同任务的准备过程，即当任务重复时，个体只需要重复应用上一个任务规则即可完成任务的准备，因而其诱发的 CNV 波幅较负，但当任务线索发生切换时，个体维持在工作记忆的规则已不再适用，需要重新从工作记忆中提取与当前线索匹配的规则才能完成任务的准备，进而诱发更正的 CNV 波幅。与低层级任务切换相比，高层级任务切换需要在记忆中提取的线索信息更复杂，重构任务规则的时间更长，因此其诱发的 CNV 波幅的正走向更明显。

4.2 反应性控制的层级性

反应性控制指在将要做出反应时，灵活地运用即时出现的任务相关信息解决冲突，并在需要运用先前的线索解决当前的冲突时，通过检索来重新激活先前的线索信息，以指导当前的反应并修正可能存在的错误反应倾向（Braver et al., 2007）。在本研究的低层级任务中，个体已经在线索呈现后的任务准备过程中进行了有效的准备，待目标出现时直接提取线索信息进行按键反应；而在高层级任务中，目标刺激出现之后，仍需要检索激活先前的线索信息所代表的规则对目标刺激的第一个维度（先决条件）进行加工，判断该任务是否需要按键反应，如需则提取反应按键规则，并根据规则进行按键反应。因此，在高层级任务中需要更多的反应性控制。脑电结果表明，任务切换相比任务重复诱发更小的 P2 波幅。P2 成分被认为与任务激活相关（Kieffaber & Hetrick, 2005），有研究者将这一成分解释为检索 S-R 联结或评估刺激维度特征是否与目标刺激相关的指标（Rushworth et al., 2002）。同时，本研究发现切换效应受到层级属性的调控，具体表现为在高层级任务切换相比高层级任务重复诱发更小的 P2 波幅，而在低层级任务中，低层级任务切换相比低层级任务重复诱发的 P2 波幅并无差异。因此，我们推断当目标数字出现时，高层级任务仍需对数字的维度特征进行加工，判别当前试次是否需要进行按键反应。倘若线索指示的规则是对奇数进行大小判断而出现的目标数字

是偶数，被试无需按键反应。因此，P2 成分在本研究中可能与评估刺激维度特征是否属于目标刺激的过程相关。

在目标锁时阶段，N2 时窗存在显著的切换效应，即任务切换相对于任务重复诱发更负的 N2 波幅，这一结果重复了以往的研究结果（Han et al., 2018; Gajewski et al., 2010; Nicholson et al., 2005; Swainson, et al., 2006; Swainson et al., 2003）。以往研究结果发现，目标锁时的 N2 成分在前额及中央区分布最为广泛，源定位分析发现 N2 成分主要来源于扣带回前侧。N2 成分在冲突条件下更大，因此它与冲突监控（Van Veen & Carter, 2002; Yeung & Cohen, 2006）或与反应选择机制有关（Gajewski et al., 2008, 2010, 2018; Yeung & Cohen, 2006）。在本研究中，当任务切换时，个体必须克服不相关的任务集的干扰，从而完成目标任务（Allport & Wylie, 1999; Wylie & Allport, 2000）。在 N2 成分上，高层级任务切换与任务重复间的波幅差异相比低层级任务更大，可能是因为在执行高层级任务切换要求个体抑制的信息更多。例如，当被试从 “对大于 5 的数进行奇偶判断”切换到“对偶数进行大小判断”时，他们需要抑制数字识别（即是否大于 5）和语义信息的加工。而在低层级任务水平上，当被试“从奇偶判断”切换到“大小判断”时，个体只需抑制上一个数字的一种语义信息（奇偶判断）。

已有研究表明，目标锁时的任务切换比任务重复诱发更小的 P3 或 SP 波幅主要反映了与任务执行相关的过程（Han et al, 2019）以及反应设置重构加工过程（Barceló, et al., 2000; Waszak et al., 2003; Xie et al, 2020）。在本研究中，P3 时窗也存在着明显的切换效应，即相对于任务重复，任务切换诱发更小的 P3 波幅，这和以往关于目标锁时 P3 的研究结果一致（Han et al., 2018; Karayanidis et al., 2003; 2010; Kieffaber & Hetrick, 2005; Nicholson et al., 2006; Swainson et al., 2003）。研究者认为，更小的 P3 波幅（即切换负波）可能反映了 S-R 联结稳定性降低（Barceló et al., 2000），在任务重复时，S-R 联结仍与上一个试次保持相同，个体只要按照之前的规则进行反应即可，然而在任务切换时，新建立的 S-R 联结的稳定性较低。因此，反应设置重构所需的时间就更长（即更长的反应时）。以往有部分研究（Hsieh & Wu, 2011; Li et al, 2019）将目标锁时的 P3 和晚期成分统称为晚期持续慢波，认为其与反应执行中的反应准备相关联。在本研究中，观察到在 SP 时窗上发现了显著的切换效应，任务切换相对于任务重复诱发了更小的 SP 波幅。因此推断这一反应设置重构进程延续到 SP 时窗。

最为重要的是，对高层级任务切换与任务重复间的 SP 的波幅差异和低层级任务切换与任务重复间的 SP 波幅差异进行比较，发现在左侧中后部区域，高层级任务切换的差异波波幅显著大于低层级任务，表明高、低层级任务在反应设置重构过程中认知控制过程的差异，即相对于低层级任务切换时的任务集的重构，高层级任务切换的重构更不容易，新建立的

S-R 联结也更不稳定。需要注意的是，根据 Kleinsorge 和 Heuer（1999）层级任务切换模型，与 S-R 联结规则相比，任务目标的层级更高，其认知控制的需求更高，层级性对任务目标的影响可能不同于对 S-R 联结规则的影响。与 Han 等（2018）中关于层级规则的重构过程相关的 ERP 成分即切换负波所体现的层级效应相比，本研究中在任务重构上的层级效应出现较晚。 在 Han 等（2018）的研究中反映任务集重构的层级效应出现在 P3 窗口（350～450 毫秒），而本研究出现于 SP（600～1000 毫秒）窗口，对这一研究结果的差异可能是这两个研究操纵的任务集元素不同。如 Han 等（2018）通过对线索特征指示的反应规则的操纵来探究规则切换的层级性。而本研究操纵的是任务的层级性。在一个任务集，任务比反应规则的层级更高、更抽象（Kleinsorge & Heuer, 1999），其重构也更困难。因此，其重构过程中所体现的层级性也可能较晚出现。

据此，本研究推断，在一个任务集内，不仅存在任务-联结-反应间的层级组织，一个特定任务集内的刺激、任务或规则本身也可能以层级的形式被表征。无论这一层级表征是内隐（Collins et al., 2014）还是外显（Han et al., 2018, 2019），不同层级的切换，其需要的认知控制也不同，导致的切换代价也不同，高层级（任务或规则）切换代价高于低层级切换代价。另外，在一个特定的任务集内，认知控制对如任务目标的层级控制也可能不同于对反应规则的层级控制，对前者的控制要求可能更高，所需时间更多。

本研究在已有研究基础上通过线索任务切换范式进一步探讨了认知控制的层级性，但存在如下不足之处。第一，在本研究中，层级的变化不可避免地伴随着任务的复杂性的变化（即层级越高，任务越复杂）。在未来的研究中，如何将层级和复杂性进行有效的区分值得进一步去探索。第二，在本研究中，设置 nogo 试次的目的是确保被试能够按照既定规则进行按键反应，虽然 nogo 试次数量较少，仅仅作为填充试次未纳入数据分析，后续研究可将其作为一个变量纳入进来以考察反应选择、反应抑制，以及向后抑制对层级任务切换的影响。

5 结论

本研究通过嵌套的线索-任务切换范式来探究任务切换的层级控制过程及其神经机制，结果发现，高层级任务切换代价显著高于低层级任务切换代价；线索锁时的脑电结果表明，高层级任务切换与重复间的 CNV 波幅差异显著大于低层级任务切换与重复间的波幅差异，反映了在主动性控制阶段，个体对高层级任务给予更多的主动性控制以完成对紧随之后的目标任务的准备。目标锁时的脑电结果表明，在 N2 及 SP 成分上，高层级任务切换与重复间的波幅差异显著大于低层级任务切换与重复间的波幅差异，分别反映了在抑制旧任务集与重

构新反应集的过程中增大的反应性控制。这些结果表明，在任务切换中，随着任务本身的层级（抽象或复杂程度）的提高，任务准备的主动性控制与对旧任务集的抑制与新任务集的重构相关的反应性控制水平都随之提高。

6 参考文献

Allport, A., & Wylie, G. (1999). Task-switching: Positive and negative priming of task-set. In: Humphreys, G.W., Duncan, J., Treisman, A.M. (Eds.), Attention, Space and Action: Studies in Cognitive Neuroscience. Oxford University Press, Oxford, England, pp.273–296.

Altmann, E. M. (2019). Response – cue interval effects in extended-runs task switching: memory, or monitoring? *Psychological Research, 83*, 1007–1019.

Badre, D., & D'Esposito, M. (2007). Functional magnetic resonance imaging evidence for a hierarchical organization of the prefrontal cortex. *J Cogn Neurosci*, *19*(12), 2082–2099.

Badre, D., & Nee, D. E. (2018). Frontal cortex and the hierarchical control of behavior. *Trends Cogn Sci*, *22*(2), 170–188.

Baene, W. D. , & Brass, M. . (2013). Switch probability context (in) sensitivity within the cognitive control network. *Neuroimage, 77*, 207–214.

Barceló, F., & Cooper, P. S. (2018). An information theory account of late frontoparietal ERP positivities in cognitive control. *Psychophysiology, 55*(3), e12814.

Barceló, F., Muñozcéspedes, J. M., Pozo, M. A., & Rubia, F. J. (2000). Attentional set shifting modulates the target P3b response in the wisconsin card sorting test. *Neuropsychologia*, *38*(10), 1342–1355.

Braver, T. S., Gray, J. R., & Burgess, G. C. (2007). Explaining the many varieties of working memory variation: Dual mechanism of cognitive control. In A. R. A. Conway, C. Jarrold, M. J. Kane, A. Miyake, & J. N. Towse (Eds.), Variation in working memory (pp. 76–106). New York: Oxford University Press.

Brunia, C. H. M. (1999). Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica, 101*, 213–242.

Collins, A. G., Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Human EEG uncovers latent generalizable rule structure during learning. *Journal of Neuroscience*, *34*(13), 4677–4685.

Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review. *Psychophysiology, 45*(1), 152–170.

Frober, K., Raith, L., & Dreisbach, G. (2018). The dynamic balance between cognitive flexibility and stability: the influence of local changes in reward expectation and global task context on voluntary switch rate. *Psychological Research, 82*(1), 65–77.

Gajewski, P. D., Ferdinand, N. K., Kray, J., & Falkenstein, M. (2018). Understanding sources of adult age differences in task switching: Evidence from behavioral and ERP studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 92*, 255–275.

Gajewski, P. D., Kleinsorge, T., & Falkenstein, M. (2010). Electrophysiological correlates of residual switch costs. *Cortex, 46*(9), 1138–1148.

Gajewski, P. D., Stoerig, P., & Falkenstein, M. (2008). ERP—Correlates of response selection in a response conflict paradigm. *Brain Research*, *1189*, 127–134.

Grzyb, K. R., & Hubner, R. (2013). Excessive response-repetition costs under task switching: How response inhibition amplifies response conflict. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, *39*(1), 126–139.

Han, J., Dai, Y., Xie, L., & Li, F. (2018). Brain responses associated with different hierarchical effects on cues and targets during rule shifting. *Biological Psychology*, *134*, 52–63.

Han, J., Xie, L., Cao, B., Li, J., Chen, Y., & Li, F. (2019). More abstract, more difficult to shift: Behavior and electrophysiological evidence. *Behavioural Brain Research*, *362*, 273–278.

Hirsch, P., Roesch, C., & Koch, I. (2020). Evidence for a multicomponent hierarchical representation of dual tasks. *Memory & Cognition*, *49*(2), 350-363.

Hommel, B., Gehrke, J., & Knuf, L. (2000). Hierarchical coding in the perception and memory of spatial layouts. *Psychological Research*, *64*(1), 1–10.

Hsieh, S. L., & Wu, M. Y. (2011). Electrophysiological correlates of preparation and implementation for different types of task shifts. *Brain Research*, *1423*, 41–52.

Huang, S. L., & Lin, C. D. (2009). Theoretical controversy and integration of task switching research. *Studies of Psychology and Behavior*, *7*(4), 304–311.

[黄四林, 林崇德. (2009). 任务切换机制研究的理论争议与整合. *心理与行为研究*, *7*(4), 304–311.]

Jiang, H.(2018). Reconfiguration and interference in voluntary task switching. *Advances in Psychological Science, (9)*, 1624–1631.

[蒋浩. (2018). 自主任务转换中的重构和干扰. *心理科学进展*, (9), 1624–1631.]

Karayanidis, F., Coltheart, M., Michie, P. T., & Murphy, K. (2003). Electrophysiological correlates of anticipatory and poststimulus components of task switching. *Psychophysiology*, *40*(3), 329–348.

Karayanidis & Jamadar (2014). Event-related potentials reveal multiple components of proactive and reactive control in task switching. In: Grange J.A., Houghton, G. (Eds.), task switching and cognitve control. Oxford University Press, New York. pp.200–236.

Karayanidis, F., Jamadar, S., Ruge, H., Phillips, N., Heathcote, A., & Forstmann, B. U. (2010). Advance preparation in task-switching: converging evidence from behavioral, brain activation, and model-based approaches. *Frontiers in Psychology*, *1*. 25.

Kieffaber, P. D., & Hetrick, W. P. (2005). Event-related potential correlates of task switching and switch costs. *Psychophysiology*, *42*(1), 56–71.

Kieffaber, P. D., Kruschke, J. K., Cho, R. Y., Walker, P. M., & Hetrick, W. P. (2013). Dissociating stimulus-set and response-set in the context of task-set switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*(3), 700–719.

Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological Bulletin*, *136*(5), 849–874.

Kleinsorge, T., & Heuer, H. (1999). Hierarchical switching in a multi-dimensional task space. *Psychological Research*, *62*(4), 300–312.

Lashley, K.S. (1951) The problem of serial order in behavior. In cerebral mechanisms in behavior (Jeffress, L.A., ed.), pp. 112–136, Wiley.

Li, J., Cao, B., Han, J., Xie, L., & Li, F. (2019). Not inertia but reconfiguration: Asymmetric switch cost in a hierarchical task. *Brain Research*, *1720*, 146291.

Lu, M., Doñamayor, N., Münte, T. F., & Bahlmann, J. (2017). Event-related potentials and neural oscillations dissociate levels of cognitive control. *Behavioural Brain Research*, *320*, 154–164.

Luck, S. J. , & Hillyard, S. A. . (2010). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*, *31*(3), 291–308.

Mayr, U., & Kliegl, R. (2000). Task-set switching and long-term memory retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*(5), 1124–1140.

Meiran, N. (2008). The dual implication of dual affordance: stimulus-task binding and attentional focus changing

during task preparation. *Experimental Psychology, 55*(4), 251–259.
Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience, 24*, 167–202.
Monsell, S. , & Mizon, G. A. . (2006). Can the task-cuing paradigm measure an endogenous task-set reconfiguration process?. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performan, 32*(3), 493–516.
Nicholson, R., Karayanidis, F., Bumak, E., Poboka, D., & Michie, P. T. (2006). ERPs dissociate the effects of switching task sets and task cues. *Brain Research*, *1095*(1), 107–123.
Nicholson, R., Karayanidis, F., Poboka, D., Heathcote, A., & Michie, P. T. (2005). Electrophysiological correlates of anticipatory task-switching processes. *Psychophysiology*, *42*(5), 540–554.
Nie, Qi-Yang, Mueller, Hermann, J., & Conci. (2017). Hierarchical organization in visual working memory: from global ensemble to individual object structure. *Cognition: International Journal of Cognitive Psychology, 159*, 85–96.
Poljac, E., & Yeung, N. (2014). Dissociable neural correlates of intention and action preparation in voluntary task switching. *Cerebral Cortex, 24*(2), 465–478.
Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictible switch between simple cognitive tasks. *Journal of experimental psychology, 360*(1456), *General, 124*(122), 207.
Rosenbaum, D. A., Kenny, S. B., & Derr, M. A. (1983). Hierarchical control of rapid movement sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *9*(1), 86–102.
Rushworth, M. F. S., Passingham, R. E., & Nobre, A. C. (2002). Components of switching intentional set. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(8), 1139–1150.
Schneider, D. W. (2017). Phasic alertness and residual switch costs in task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *43*(2), 317–327.
Schneider, Darryl W.; Logan, Gordon D. (2006). Hierarchical control of cognitive processes: Switching tasks in sequences. *Journal of Experimental Psychology: General, 135*(4), 623–640.
Schuch, S., & Koch, I. (2003). The role of response selection for inhibition of task sets in task shifting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29*(1), 92–105.
Shi, Y., Q., & Zhou, X. L. (2004). Task switching, a paradigm in the study of executive control. *Advances in Psychological Science, 12*(5), 672–679.
[史艺荃, 周晓林. (2004). 执行控制研究的重要范式——任务切换. *心理科学进展, 12*(5), 672–679.]
Swainson, R., Cunnington, R., Jackson, G. M., Rorden, C., Peters, A. M., Morris, P. G., & Jackson, S. R. (2003). Cognitive control mechanisms revealed by ERP and fMRI: Evidence from repeated task-switching. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(6), 785–799.
Swainson, R., Jackson, S. R., & Jackson, G. M. (2006). Using advance information in dynamic cognitive control: An ERP study of task-switching. *Brain Research*, *1105*, 61–72.
Swainson, R., Martin, D., & Prosser, L. (2017). Task-switch costs subsequent to cue-only trials. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *70*(8), 1453–1470.
Swainson, R., Prosser, L., Karavasilev, K., & Romanczuk, A. (2019). The effect of performing versus preparing a task on the subsequent switch cost. *Psychological Research, 85*(1), 364–383.
Tarantino, V., Mazzonetto, I., & Vallesi, A. (2016). Electrophysiological correlates of the cognitive control processes underpinning mixing and switching costs. *Brain Research*, *1646*, 160–173.
Vandierendonck, A., Liefooghe, B., & Verbruggen, F. (2010). Task switching: Interplay of reconfiguration and interference control. *Psychological Bulletin*, *136*(4), 601–626.
Van Veen, V., & Carter, C. S. (2002). The timing of action--monitoring processes in the anterior cingulate cortex.

Journal of Cognitive Neuroscience, 14(4), 593–602.

Waszak, F., Hommel, B., & Allport, A. (2003). Task-switching and long-term priming: Role of episodic stimulus–task bindings in task-shift costs. *Cognitive Psychology*, *46*(4), 361–413.

Woodward, T. S., Meier, B., Tipper, C., & Graf, P. (2003). Bivalency is costly: Bivalent stimuli elicit cautious responding. *Experimental Psychology, 50*(4), 233–238.

Wylie, G., & Allport, A. (2000). Task switching and the measurement of "switch costs". *Psychological Research*, *63*(3-4), 212–233.

Wylie, G. R., Murray, M. M., Javitt, D. C., & Foxe, J. J. (2009). Distinct neurophysiological mechanisms mediate mixing costs and switch costs. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(1), 105–118.

Xie, L., Cao, B., Li, Z., & Li, F. (2020). Neural dynamics of cognitive control in various types of incongruence. *Frontiers in Human Neuroscience*, *14*, 214.

Yeung, N., & Cohen, J. D. (2006). The impact of cognitive deficits on conflict monitoring. Predictable dissociations between the error-related negativity and N2. *Psychological Science, 17*(2), 164–171.

Zhu, M., Zhuo, B., Cao, B., & Li, F. (2020). Distinct brain activation in response to negative feedback at different stages in a variant of the wisconsin card sorting Test. *Biological Psychology*, *150*, 107810.

Zhuo, B. X., Chen, Y., Zhu, M. Q., Cao, B. H., & Li, F. H. (2021a). Response variations can promote the efficiency of task switching: Electrophysiological evidence. *Neuropsychologia, 156*, 107828.

Zhuo, B. X., Zhu, M. Q., Cao, B. H., & Li, F. H. (2021b). More change in task repetition, less cost in task switching: Behavioral and event-related potential evidence. *European Journal of Neuroscience, 53*(8), 2553–2566.

Hierarchical control in task switching: Electrophysiological evidence*

WU Jianxiao [1,2], CHEN Yun [1], LI Zixia[1], LI Fuhong [1]

([1]School of Psychology, Jiangxi Normal University, Nanchang, 330022, China)

([2]School of Business Administration, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, 330099, China)

Abstract

The task-switching paradigm is one of the leading research paradigms that is widely used to explore cognitive control. Previous studies have shown that switch costs are greater for high hierarchical tasks than for low hierarchical tasks, and a number of ERP studies on rule structure learning, rule switching, task complexity, and asymmetric task switching have coherently found that N2, P3, and late components are associated with the hierarchical control process. For example, Lu et al. (2017) designed three levels of tasks, but were not concerned with switch costs. Li et al. (2019) also designed three levels of tasks, but were concerned with asymmetric switch costs. The other two studies (Collins et al., 2014; Han et al., 2018) focused on stimulus or rule switching without concern for task switching. However, to date, no study has clearly addressed the ERP

correlates of hierarchical effects in task-switching.

A nested cue-task switching paradigm was used to investigate the brain responses associated with different hierarchical effects in task switching. Participants were asked to perform two hierarchical tasks. In the low hierarchical task, participants judged digits (1–9, except 5) as large/small or odd/even, respectively. In the high hierarchical task, participants identified the semantic features of the presented digits (e.g., whether the digit was an even number) before they performed the low hierarchical task (e.g., the large/small task). For example, participants first identified whether the current number was a large digit (i.e., greater than five) and then made an odd/even judgment on it. If the current number was not greater than five, then they did not respond (no-go trials). The proportion of no-go trials was 16%, and the no-go and subsequent go trials were excluded from data analysis. Thirty Chinese students (15 males) participated in the EEG experiment. They were asked to press the "F" key for odd or large numbers and the "J" key for even or small numbers. The links between the attributes of the cues and response keys were counterbalanced between participants.

Behavioral results showed that the RT was longer for the high hierarchical trials than for the low hierarchical trials, indicating that the high hierarchical task was more complex than the low hierarchical task. Furthermore, there was a significant interaction between transition type and hierarchical level, with greater switch costs occurring in the high hierarchical task than in the low hierarchical task, indicating that switching in a low hierarchical task is easier than in a high hierarchical task. Cue-locked ERP results showed that the main effect of the hierarchical level was significant in P2, with higher P2 amplitudes for the high hierarchical trials than for the low hierarchical trials. A significant main effect of transition type was found in the CNV, with higher CNV amplitudes for the high hierarchical trials than for the low hierarchical trials, and there was a significant interaction between transition type and hierarchical level. Further analysis of this interaction revealed that task-switching trials elicited larger CNV amplitudes than task-repeating trials in the high hierarchical task, but not in the low hierarchical task. The target-locked ERP results showed that the main effect of transition type was significant for N2, P3, and SP. The difference in N2 and SP amplitudes between high hierarchical task switching and task repetition was significantly greater than between low hierarchical task switching and task repetition.

The purpose of the present study was to explore the ERP correlates of hierarchical effects in

task-switching. The behavioral results replicated previous findings. Cue-locked ERP results indicated that the hierarchical effect first appeared in the P2 component and that the switch effect on the CNV component was modulated by the task hierarchy, reflecting more selective attention given to high hierarchical tasks and higher proactive control during the task-set reconfiguration stage. The target-locked ERP results indicated that task switching induced more negative N2 amplitudes and smaller P3 and SP amplitudes compared to task repetition. The difference wave amplitudes between high hierarchical task switching and repetition were significantly greater for the N2 and SP amplitudes than for the low hierarchical task, reflecting that the process of inhibiting the old task-set and reconfiguring the new response set is more complex, resulting in increased reactive control. These findings provide new evidence for the task-set reconfiguration theory and the hierarchical nature of cognitive control.

Keywords: cognitive control, task switch, switch costs, hierarchical control